

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560917

研究課題名(和文) マイクロリアクター内のソノケミストリーとソノルミネッセンスの研究

研究課題名(英文) Study on sonochemistry and sonoluminescence in a microreactor

研究代表者

畑中 信一 (Hatanaka, Shin-ichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：40334578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：ソノケミストリー(超音波化学)として知られる、液体への超音波照射による化学効果をマイクロリアクター内で生じさせることを目的とし、その反応場をスケールダウンしたときの影響について検討した。断面の寸法が0.1 mm×0.1 mmのマイクロ流路を用い、その一次元的(1D)な場が、通常の三次元的(3D)な場に比べて、ソノケミルミネッセンス(音響化学発光)という化学反応に伴う発光強度比で、条件によって約1.5倍になることがわかった。一方、反応源であるキャビテーション気泡の数を極限まで減らした、シングルバブルの実験で、安定に振動する気泡より、不安定に合体や分裂をする気泡の方が化学反応に有効なことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Sonochemistry, chemical effects of ultrasound, in a microreactor was studied by a microfluidic experiment using a 0.1 mm x 0.1 mm microchannel and a single-bubble cavitation experiment. The microfluidic results demonstrated that, at relatively low levels of power density, selecting a solution of dissolved gas degree of saturation (DOS) in the supersaturation range at atmospheric pressure resulted in higher yields per unit volume in the 1D space compared to that obtained from the 3D space. This effect is attributed to a decrease in the cavitation threshold of the 1D reaction system. The single-bubble results showed that the hydroxyl radical amount for a dancing bubble, where the single bubble was dancing below the lower threshold of pressure amplitude for sonoluminescence, was greater than that for a stable bubble. The results imply that the instability of bubbles significantly enhances sonochemical efficiency in liquid phase.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学 反応工学・プロセスシステム

キーワード：マイクロリアクター ソノケミストリー(超音波化学) ソノルミネッセンス(音響発光) ソノケミルミネッセンス(音響化学発光) 音響キャビテーション 気泡ダイナミクス シングルバブル ヒドロキシルラジカル定量

1. 研究開始当初の背景

(1) 液体への強力な超音波の照射によって、様々な化学作用を生じることが報告されており、現在、ソノケミストリー (超音波化学) として知られている。その化学作用の源は、超音波の波動としてのエネルギーの直接的な作用ではなく、超音波によって生じた微小な気泡 (キャビテーションと呼ばれる気泡) が圧縮破壊 (圧壊) する時に生じる極限環境場を源としている。実験的に見積もられた気泡の最高到達温度・圧力は 5000°C・500 atm にも達する (条件によっては 1 万度 1700 気圧以上も報告されている) が、高温・高圧は局所的・瞬間的であるので、マクロ的な反応場は常温・常圧のままである。そのため、ソノケミストリーにおける反応場は、環境に低負荷の極限環境反応場であり、高温を必要とする反応でも熱を加える必要がないため、省エネルギーも見込める将来有望な新規反応場と言える。

(2) ソノケミストリーの問題点を挙げると、異なる研究室間・装置間での実験の再現性が非常に悪いことである。また、多くの場合、決して効率が高いとは言えない。それは、(1) で述べたように、超音波の化学作用が音波としての直接の作用ではなく、キャビテーション気泡による作用であることに起因するであろう。文献等におけるソノケミストリーの音響学的な実験条件の記述は、超音波のパワーと周波数であるが、たとえそれらが同一だとしても、気泡の数や気泡のサイズ、気泡の分布は他の条件に依存して異なってくる。化学反応に有効な気泡はサイズ依存性があり、有効な気泡数や分布は様々な条件によって変化する。そして、有効な気泡が存在しない領域では反応が起こらないため、その割合が比較的大きいことが、反応効率を下げる原因となっていると推察される。有効な気泡数や分布を制御し、かつ、反応に有効でない体積を減らすことが、ソノケミストリーの制御性を高めて、かつ、反応効率を高める方法の一つと考えられる。そのため、マイクロ流路等の微小領域においては、ソノケミストリーの再現性や効率が高まると期待できる。

(3) マイクロリアクター (マイクロ流路) 内でもソノケミカル反応が起こることは、研究分担者である辻内氏・安井氏の旧研究グループ (旧グループ長：飯田康夫氏) が 2004 年に初めて発表した (Y. Iida, K. Yasui, T. Tuziuti, *et al.*, *Chem. Comm.*, 2004, 2280)。飯田氏らはここで、長さ 200 μm の一次元および二次元のマイクロ流路や数十ミリメートルの三次元空間でのラジカル生成量の比較を行っている。

(4) 研究申請時にはマイクロリアクター内のソノケミストリーの報告は少なかったが、近年、盛んに行われつつある。例えば、以下のようなものがある。Rivas らは (D.F. Rivas, *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.* **49**, 2010, 9699)、シリコン基板上に微細加工により作製した微小

ピットからマイクロバブルを生じさせている。この研究で Rivas らは、ルミノールを用いたソノケミルミネッセンス (音響化学発光) を基にラジカル生成とピットの数が相関することを示した。Tandiono らは (Tandiono *et al.*, *Lab Chip*, **10**, 2010, 1848)、マイクロ流路中の水へ超音波を照射し、最適な音圧振幅の下で不安定化した気液界面近傍において、液中で気泡が生じるとともに、膨張収縮しつつ気液界面から離れてゆく画像を示している。この研究で Tandiono らは、このような気泡はソノケミカル反応に寄与しているのではないかと考察している。

(5) マイクロリアクター内のソノルミネッセンスについても、当時は報告が無かったが、現在、Tandiono ら (Tandiono *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 2011, 5996) や、Rivas ら (D. F. Rivas *et al.*, *Ultrason. Sonochem.*, **19**, 2012, 1252) をはじめ、いくつかの報告がある。

2. 研究の目的

(1) ソノケミストリーとして知られる液体への強力超音波照射による化学効果をマイクロリアクター内で生じさせ、マクロ的な反応場と比較して、その特性を明らかにすることを目的とした。マイクロ流路内でのソノケミルミネッセンスを測定し、その一次元的 (1D) 発光強度を三次元 (3D) 空間と比較検討した。

(2) 一方で、ソノケミストリーの反応源であるキャビテーション気泡の数を極限まで減らした単一の気泡、すなわち、シングルバブル・キャビテーション気泡により、ソノルミネッセンス発光パルス強度やヒドロキシルラジカル量の音圧・周波数依存性、および、気泡ダイナミクスとの関係を検討した。

3. 研究の方法

(1) マイクロ流路の実験について、実験装置の概略を図 1 に示す。ルミノールはヒドロキシラジカルと反応し青色の蛍光を発する。ルミノール水溶液は 10.0 mM の NaOH (和光純薬) と 56.4 μM のルミノール粉末 (和光純薬) を純水に溶かして作製した。溶存空気濃

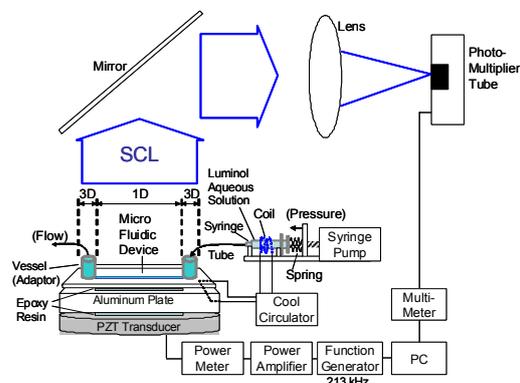


図 1 マイクロ流路の実験装置の概略図 (reproduced from 5.雑誌論文② by permission of © 2013 American Chemical Society)

度については、バブリングや温度制御により調製した。ルミノール水溶液を直径 20.2 mm のピストンを有するシリンジ (NORM-JECT 20 mL) に充填し、シリンジポンプ (YMC YSP-101)でマイクロ流路へ圧送した。マイクロ流路のチップ(Translume SSC-100-100-L-1)は1個の1D(マイクロ流路)とその両端に接続する2個の3D(アダプター)部分に分かれている。溶存空気飽和度(Degree of Saturation; DOS)は溶存酸素飽和度と比例する値として、溶存酸素メーター(YSI ProODO)で測定した。DOSはシリンジ加圧前の値として5通り用意した(大気圧下でDOS = 1.001, 1.048, 1.097, 1.150, 1.200)。シリンジ加圧下でのシリンジ内水溶液が感じる静圧は、ばね定数のわかっているばね(TRUSCO TCS 1000-120-120; ばね定数: 6.963 N/mm)の変位とシリンジ断面積から計算することができ、2.02 atmであった。ここで液に加わる力は、ベルヌーイの定理に基づいて計算して求め、33.1 Nであった。この力を求める際に、シリンダーとシリンジ間の摩擦による影響を考慮しており、また、シリンジ移動速度は0.64 mm/sと比較的ゆっくりしていることに注意したい。このシリンジ加圧下での水溶液の飽和度は、順に0.500, 0.524, 0.549, 0.575, 0.599である。1Dであるマイクロ流路の断面の寸法は100 μm \times 100 μm である。この流路は1 mmの厚みで25.4 \times 50.8 mmの寸法を持つガラスプレート上にある。1D部分はガラスプレートの長手方向に沿った22 mmの長さを有している。3D部分は1Dの両端に二つ同一の円筒形状で存在し、それぞれ内径30 mm、高さ8.8 mmである。1Dの体積は0.22 mm^3 であり、3Dは124.4 mm^3 である。液送は一方の3Dから1D、そしてもう一方の3Dを通過して行く。先述の力の計算を基に液送速度を求め、0.489 mL/minを得た。直径50 mmのPZT振動子と水溶液は、恒温槽(AS ONE CH-202)からの冷却水を、シリンジ周囲のコイルや、振動子とマイクロチップに薄層のエポキシ樹脂を介して接するアルミ板(23.4 \times 54.5 \times 10.0 mm)内部を通過させることにより、19.5 \pm 0.5 $^{\circ}\text{C}$ の温度範囲に制御した。3D部分の下のマイクロチップとアルミ板との間にギャップを設けてある。振動子の駆動によりマイクロチップの表面波が励起され、1D、3Dそれぞれの液中へ音波が入射される。信号発生器(NF 1942)からの連続正弦波を55 dBのパワーアンプ(ENI 1140LA)で増幅し振動子へ印加した。振動子への投入パワーはパワーメータ(Towa TAW60A)で測定した。音響化学発光(ソノケミルミネッセンス Sonochemiluminescence; SCL)は光電子増倍管(Hamamatsu R928)で測定した。光電子増倍管からの出力電圧をデジタルマルチメーター(ADVANTEST TR6847)で読み取り、そのデータをコンピュータ(NEC PC9821Xc16)に蓄積した。各発光強度測定は3回行った。この測定は、まず1Dと3D部分の合算として全体

を測定し、次に3D部分をアルミホイルで覆い1D部分のみ測定して、合算値から1D部分の値を差し引いた値を、3D部分の値として見積もった。3D部分は不透明で光が減衰することを考慮するために、その減衰率を分光器(Hamamatsu C10082CAH)と光源(LED LENSER V2)を用いて求めた。その結果、透過により元の1/9.15となることがわかった。ゆえに、3D部分の測定値に9.15をかけたものが1D部分の測定値と比較できる。

(2) シングルバブルの実験について、実験装置の概略を図2に示す。また、容器内にシングルバブルが補足されて発光している(シングルバブル・ソノルミネッセンス: SBSL と呼ばれる)写真を図3に示す。図2に示すように、ファンクション・ジェネレーターからの連続正弦波信号をパワーアンプで増幅し、容器底面のランジュバン型振動子で超音波に変換した。石英ガラス製の矩形容器(内寸56 mm \times 56 mm \times 80 mm)に入れ、液面のパラフィン製フィルムによってガス溶解を抑制した。液温は室内の空調により、20 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$ に保持した。注射器によって種気泡を投入し、シングルバブルを得て、試料水溶液への超音波照射を行った。超音波照射中、シングルバブルを光散乱計測・ストロボ観察システムによってモニターした。音圧は気泡位置でのニードル型マイクロホン出力を校正済みマイクロホンで換算して求めた。試料は2 mMのテレフタル酸(TA)水溶液を用い、超音波照射後の溶液を分光蛍光光度計により励起波長315 nmで蛍光測定した。波長430 nmの蛍光のピーク値について、標準物質のヒドロキシテレフタル酸(HTA)の蛍光値を用いてOHラジカル量に変換し、TAのOH捕捉効率を考慮してOHラジカル生成量に換算した。

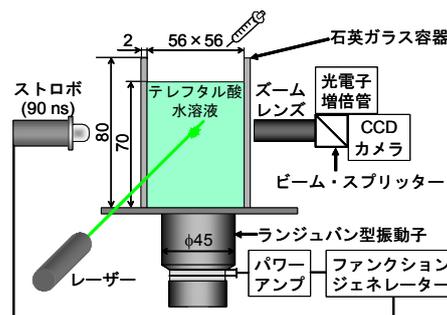


図2. シングルバブル実験装置の概略図

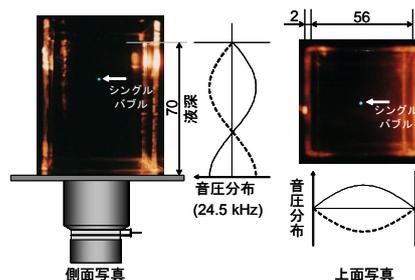


図3. シングルバブル・ソノルミネッセンス

4. 研究成果

(1) 図4に体積比で規格化された、3DのSCL強度に対する1DのSCL相対強度（SCL強度比）を示す。図の横軸からの点線は、各DOSでの閾値からの立ち上がりを示す。横軸に平行な実線は、体積比とSCL強度比が等しい場合で、1と定義される。この値が1より大きいとき、1Dが3Dより有効にソノケミカル反応を行っている体積を有していると解釈される。ここでいう、体積が有効とは、評価対象とする空間においてソノケミカル反応を生じていない体積の占める割合が小さいことを意味する。図から、DOS=0.549の低パワーでの値を例外とするものの、SCL強度比は体積比より大きいことがわかる。興味深いことに、最も高いDOS=0.599の場合、パワー密度として約1 W/cm²で立ち上がり、フィッティング曲線でのSCL強度比は、体積比に対し約1.5倍という値を示した。

この高いDOSでの傾向について、次のように考察される。3Dにおいて気泡は過剰に生成されるため音波伝搬を阻害し音圧振幅は低くなる。比較的lowパワー密度のために急激な収縮を引き起こすことが抑制され、反応に寄与する気泡数は少なくなる。1Dにおいては、気泡数は少ないものの大半は有効に作用し、よって3Dとの比較において有効な反応体積を多く有することになる。こうして比較的lowパワー密度で高DOSのとき、規格化SCL強度比は最大値を示し、1Dの微小空間は有効に作用することがわかる。3Dにおいてlowパワー密度では急激な収縮を示さない気泡は、パワー密度が高くなると反応に寄与でき、その有効な気泡数の増加は1Dより著しい。ゆえに、規格化SCL強度比はパワー密度とともに低下する。

3Dが1Dより有効となる条件は限定的ながら存在する。それはパワー密度の範囲とDOSの選択によりもたらされる。図において1.8-1.9 W/cm²でDOS=0.549の場合、規格化SCL強度比は1より小さいことがわかる。この場合の

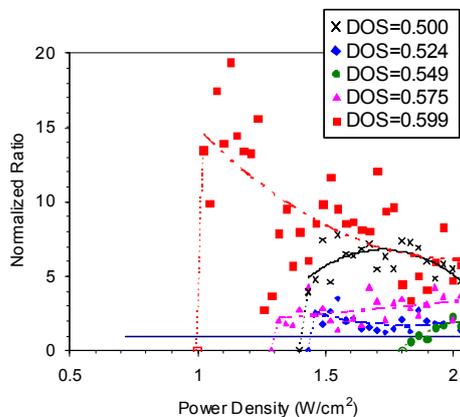


図4. 体積比で規格化された3Dに対する1DのSCL相対強度のパワー密度依存性。(reproduced from 5.雑誌論文② by permission of © 2013 American Chemical Society)

パワー密度は、先述の1Dで反応が有効となる値(約1 W/cm²)より高い。また、DOSについては、1Dで反応が有効となる値(DOS=0.599)より低い。

飯田氏らは1.(3)に示した文献中で、1Dと3Dのソノケミカル反応効率の比較を、ヒドロキシラジカルとテレフタル酸の反応により生成される、蛍光を呈するヒドロキシテレフタレートイオンの生成率を決定して行った。このとき飯田氏らは、1Dについて2.4 mm³の体積で1.5×10¹⁰ mol/s、3Dについては4000 mm³の体積で1.0×10¹³ mol/sを得た。これは図4において比較できる強度比として2.5に相当する。飯田氏らがDOS=0.500で得た値と仮定すると、本報告の値と比べてやや低いことがわかる。この理由として、飯田氏らが用いた1Dの体積が、本報告のそれより大きく、反応に有効でない体積を多く含んでいたためと推察される。

(2) 図5に周波数24.5 kHzにおいて、音圧振幅を変化させたときのシングルバブルの半径変化を超音波の一周期にわたって示す。半径変化は、レーザー光散乱法による光電子増倍管(PMT)出力の平方根を、ストロボによる画像計測から求めた最大径および平衡径(図6)にフィッティングして絶対値で表した。図の中段には、PMT出力によるシングルバブル・ソノルミネッセンス(SBSL)の発光パルスの相対強度を示す。ただし、SBSLは珪酸ガラス性のズームレンズを通していているため、350 nm以下の波長の光はカットされている。また、図の下段には、実測した音圧を示す。図5から、0.1 atm程度の音圧振幅の減少で、気泡の最大径は大きく減少しているのがわかる。また、最大径の減少に伴い、圧壊のタイミングも早くなっている。圧壊に対応した発光タイミングの位相もずれており、発光強度が急激に減少していることがわかる。音圧振幅1.07 atmでは気泡は激しく動き回り(ダンシング)、発光は検出されなかった。ちなみに、気泡がダンシングする原因は、気泡が周期ごとに少しずつ成長し、ある程度まで成長したらマイクロバブルを吐き出して、その反跳で動くせいである。なお、気泡がマイクロバブルを吐き出している様子を図6(d)に示した。

図7に図5と図6で示したシングルバブルによる1周期(1圧壊)あたりのヒドロキシラジカル(OHラジカル)量を音圧振幅に対して示す。安定したシングルバブルでは、OHラジカル量は音圧振幅に比例しているのがわかる。

図7で注目すべきは、1.07 atmの条件におけるダンシング気泡の結果である。音圧振幅が低いにもかかわらず、また、音響発光していないにもかかわらず、OHラジカル量は1.13 atmおよび1.30 atmのときよりも多い。安定気泡のOHラジカル量を1.07 atmまで外挿すれば、ダンシング気泡は安定気泡の約3倍のOH量となっている。なお、ソノルミネッセンス

発光閾値以下の音圧で気泡がダンシングするのは、気泡内のアルゴン精留が起こっていないためと考えられている。ここで、アルゴン精留説について説明すると、音圧振幅が大きくなるにつれて気泡の圧壊は激しくなり、それとともに断熱圧縮によって加熱される気泡内部は高温になっていく。空気中の窒素(N₂)や酸素(O₂)が分解するほど高温・高圧になると、化学反応を起こして窒素酸化物(NO_x)さらには亜硝酸・硝酸(HNO₂・HNO₃)ができる。これらは非常に水に溶解易いため、気泡内には空気中に1%存在しているアルゴンガス(Ar)だけが残るといふ説である。Arだけのときに気泡内ガスの流入・流出が超音波の1周期で釣り合っている条件のため、N₂やO₂が分解せずに存在する条件では、周期毎に次第にガスが溜まって気泡が成長する。なお、溶解ガスが空気するときのSBSLは気泡内がアルゴン精留されてはじめて発光すると考えられている。

研究分担者の安井氏らは、コンピューターシミュレーションによって、空気気泡では気泡内が高温になりすぎると、OHラジカル量が減少することを報告している。これは、上記で述べた硝酸・亜硝酸がOHラジカルとの反応の結果生じることに由来する。この理論に基づいて考察すれば、ダンシング気泡条件(1.07 atm)からSBSLが検出される安定気泡条件(1.13 atm)の音圧範囲内では、次第に気泡内で生成されるOHラジカル量が減っていくと考えられる。気泡内がアルゴンだけになった後は、OHラジカルがN₂やO₂との反応で消費されることがないので、音圧振幅とともにOHラジカル量が増加する。一方、Storeyらは(B.D. Storey and A.J. Szeri, "Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry," Proc. R. Soc. Lond. A, 456, 1685-1709 (2000)), 安定気泡では球面の気液界面を突き抜けて液体に取り込まれるOHラジカルの割合は少なく(0.001)、気泡内で生成したOHラジカルが液中に少量しか溶解し出してこないことを示唆している。ただし、安井氏らは同様のOHラジカル取り込み率でも、圧壊時の高圧によって気液界面へのOHラジカルの衝突頻度が多くなるため、圧壊時には30%の気泡内で生成したOHラジカルが出てくるため、1周期でも1%弱は液体内に溶解し出してくるといふシミュレーション結果を得ている。

ダンシング気泡の生じるOHラジカル量が、それよりも少し高い音圧振幅における安定気泡のOHラジカル量よりも多いという本実験結果は、気泡内で生成するOHラジカル量の大小に起因するのか、もしくは、気泡周囲の液体に溶解し出してくるOHラジカル量の大小に起因するのかは、さらなる研究が必要である。しかし、安定気泡よりも低い音圧振幅でのダンシング気泡の方が、液体内のOHラジカル量が多く検出され、かつ、その増加の程度が定量的に示されたことは、非常に意義深いと言える。

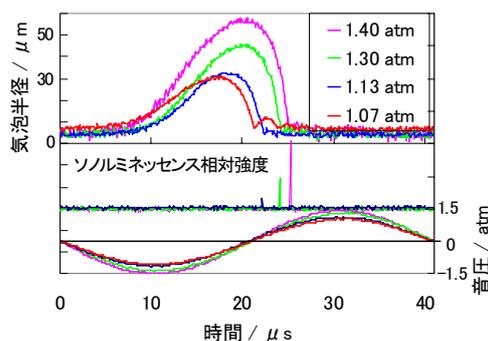


図5. 各音圧振幅の24.5 kHz 超音波における気泡半径とソノルミネッセンス(PMT出力)および実測音圧の1周期の時間変化. 音圧振幅1.40, 1.30, 1.13 atmのとき気泡は安定しており、1.07 atmのときはダンシングしている。

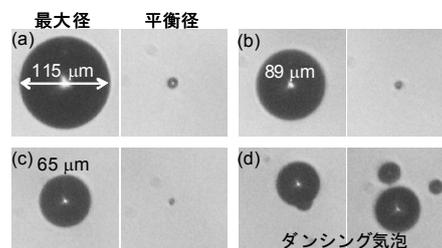


図6. 24.5 kHz 超音波における気泡の最大径(左図)と平衡径(右図)のストロボ画像: 音圧振幅(a)1.40, (b)1.30, (c)1.13, (d)1.07 atmのとき. なお、(d)については最大径と平衡径ではなく、気泡が分裂している画像を選び出して示した。

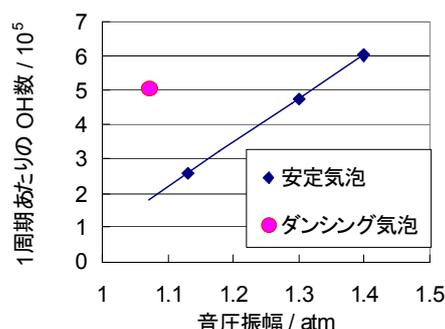


図7. 周波数24.5 kHzのシングルバブルの1周期あたりに生じるOHラジカル量の音圧振幅依存性. 各シングルバブルの気泡ダイナミクスは図5に示したものである。

図8に音圧振幅を1.30 atmで一定とし、周波数を変化させたときの図5と同様の図を示す。気泡の最大半径は周波数が25, 33, 44 kHzと高くなるにつれて41, 36, 32 μmと少しずつ減少している。一方、ソノルミネッセンスの発光強度は、音圧を変化させたときと比べて、それほど大きく変化していないのがわかる。気泡の圧壊のタイミングで発光が生じて

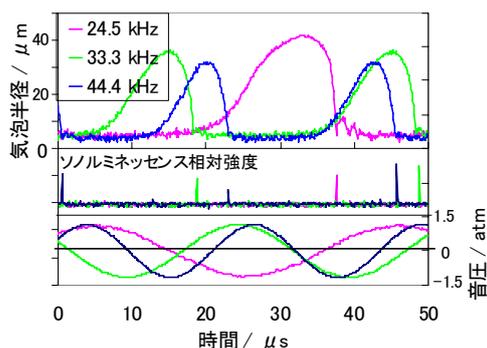


図 8. 音圧振幅 1.30 atm, 周波数 24.5, 33.3, 44.4 kHz における気泡半径とソノルミネッセンスおよび実測音圧の時間変化。

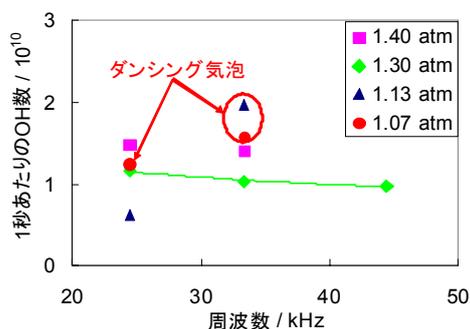


図 9. シングルバブルの 1 秒あたりに生じる OH ラジカル量の周波数依存性。

いるため、同じ時間内では周波数が高い方が発光の回数が多いことに注意すべきである。図 7 において 1 圧壊あたりの OH ラジカル量を示したが、単位時間あたりの OH 量が実際の応用上では重要であろう。そこで、周波数依存性については、単位時間 (1 秒) あたりの OH ラジカル量を図 9 に示す。OH ラジカルは周波数とともに減少するが、1 圧壊あたりの OH ラジカル量の減少分が圧壊回数の増加で補完され、あまり差が現れない。ここで、最も OH ラジカル量が多いのは、44.4 kHz のダンシング気泡であることがわかる。ダンシング気泡による OH ラジカル量の増加は、高い周波数でより顕著になる可能性がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 1 件)

- ① 辻内 亨、外部からの超音波照射によるマイクロ流路内の化学反応、超音波テクノ、査読無、Vol. 26, No. 2, 2014, pp. 54-58
http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=3247
- ② Toru Tuziuti, Influence of Degree of Gas Saturation on Sonochemiluminescence Intensity Resulting from Microfluidic Reactions, J. Chem. Phys. A, 査読有, Vol. 117, No. 41, 2013, pp. 10598-10603
 DOI: 10.1021/jp407068n

- ③ Shin-ichi Hatanaka, Sonoluminescence, sonochemistry and bubble dynamics of single bubble cavitation, AIP Conf. Proc., 査読有, Vol. 1474, 2012, pp. 163-166
 DOI: 10.1063/1.4749322
- ④ 畑中 信一、シングルバブル・キャビテーションの気泡ダイナミクスとラジカル生成量の関係、超音波テクノ、査読無、Vol. 24, No. 2, 2012, pp. 7-12
http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=2714

[学会発表] (計 2 1 件)

- ① Shin-ichi Hatanaka, Effect of gases on radical production rate during single-bubble cavitation, 21st International Congress of Acoustics (ICA2013), Palais des congrès de Montréal, 2013 年 6 月 7 日
- ② 畑中信一、音響キャビテーション気泡のダイナミクスとソノルミネッセンス・ソノケミストリーの関係、第 16 回オーガナイズド混相流フォーラム(OMF2012)、松山市道後温泉葛城、2012 年 12 月 7 日 (招待講演)
- ③ 畑中信一、ソノルミネッセンス気泡のダイナミクスとラジカル生成速度の関係、第 4 回超音波とマイクロバブルの相互作用に関するシンポジウム、名古屋駅前イノベーションハブ、2012 年 1 月 20 日 (招待講演)
- ④ Shin-ichi Hatanaka, Relationship between sonoluminescence, radical production and cavitation dynamics, The 20th annual meeting of Japan Society of Sonochemistry & The International Workshop on Advanced Sonochemistry, 名古屋大学, 2011 年 11 月 4 日 (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畑中 信一 (HATANAKA, Shin-ichi)
 電気通信大学・大学院情報理工学研究所・助教
 研究者番号: 40334578

(2) 研究分担者

辻内 亨 (TUZIUTI, Toru)
 独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員
 研究者番号: 70357515

安井 久一 (YASUI, Kyuichi)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員
 研究者番号: 30277842

(3) 連携研究者

小塚 晃透 (KOZUKA, Teruyuki)
 独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員
 研究者番号: 60357001